

# 秦岭太白山土壤 CO<sub>2</sub> 的释放特征及温度的影响

屈 冉<sup>1,2</sup>, 李俊生<sup>2</sup>, 罗遵兰<sup>2</sup>, 吴晓莆<sup>2</sup>, 赵彩云<sup>2</sup>, 汤 博<sup>2</sup>

(1 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875 2 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 秦岭山系是我国南北气候的分界线, 地理位置独特, 对气候变化响应比较明显, 气温升高会影响其土壤碳释放。因此对秦岭土壤 CO<sub>2</sub> 释放特征的研究具有重要意义。通过对秦岭主峰太白山六种不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放特征的野外测定, 结果表明, 太白山土壤 CO<sub>2</sub> 的释放从 8:00–11:00 升高, 11:00–16:00 达到峰值; 土壤 CO<sub>2</sub> 的释放速率的大小顺序是: 阔叶栎林 > 桦木林 > 落叶阔叶林 > 太白红杉林 > 秦岭冷杉林 > 高山草甸。不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 的释放速率与温度呈正相关, 与地表气温以及土层深度 0~5 cm 处温度呈极显著正相关性。不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的 Q<sub>10</sub> 顺序是: 秦岭冷杉林 > 桦木林 > 阔叶栎林 > 高山草甸 > 落叶阔叶林 > 太白红杉林。

**关键词:** 太白山; 土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率; 温度; Q<sub>10</sub>

中图分类号: S154.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2010)02-0188-06

## Character of Release of Soil CO<sub>2</sub> and the Impact of Temperature in the Taibai Mountain of Qinling

QU Ran<sup>1,2</sup>, LI Jun-sheng<sup>2</sup>, LUO Zun-lan<sup>2</sup>, WU Xiao-pu<sup>2</sup>, ZHAO Cai-yun<sup>2</sup>, TANG Bo<sup>2</sup>

(1. College of Water Sciences Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences Beijing 100012, China)

**Abstract** The Qinling mountain system is north and south climate boundary of China, the geographical position is unique. It is quite obvious to the climatic change response. The elevation of temperature will elevate will affect its soil carbon release. Therefore it is very important to research the character of release of soil CO<sub>2</sub> in Qinling. The results showed that release rate of soil CO<sub>2</sub> increased from 8:00 to 11:00, and the period of high release rate was from 11:00 to 16:00. The order of mean release rate of soil CO<sub>2</sub> was broadleaf oak stand > birch stand > deciduous broadleaf stand > *Larix chinensis* stand > *Abies densiensis* stand > alpine meadow. Release rate of soil CO<sub>2</sub> were positively correlated with temperature. The coefficients between release rate of soil CO<sub>2</sub> and air temperature and soil temperature at depth of 0–5 cm were higher than those of others. The order of the Q<sub>10</sub> value in various vegetation was *Abies densiensis* stand > birch forest > broadleaf oak forest > alpine meadow > deciduous broad leaf forest > *Larix chinensis* stand.

**Key words** Taibai mountain; Soil CO<sub>2</sub> flux; Temperature; Q<sub>10</sub>

土壤释放 CO<sub>2</sub> (即土壤呼吸速率) 是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。全球土壤是一个巨大的碳库, 其碳贮量约为 1 500 Pg, 分别是陆地植被和大气的 2 倍和 3 倍<sup>[1]</sup>。据估计, 全球土壤每年向大气释放碳 68~100 Pg<sup>[2]</sup>, 是化石燃料排放碳量的 10 倍以上<sup>[3]</sup>。因此, 即使土壤呼吸速率发生微小变化也会引起大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的明显改变<sup>[4]</sup>。土壤呼吸速率受温度、湿度、土壤碳氮含量、生物因素的影响<sup>[5–8]</sup>, 其中温度和湿度是比较重要的因素<sup>[9–11]</sup>。

在全球气温升高背景下, 研究温湿度对土壤呼吸速率的影响将具有重要现实意义。秦岭是我国南北气候分界线, 关于秦岭土壤碳的研究也有报道, 但是关于其土壤呼吸速率以及温湿度影响的报道还比较少<sup>[12–13]</sup>。研究秦岭太白山不同植被类型土壤呼吸速率以及反映 CO<sub>2</sub> 通量对温度的敏感性值 Q<sub>10</sub>, 探讨太白山土壤呼吸速率日变化规律, 并揭示温度和湿度对土壤呼吸的影响, 将有助于预测植被林地在气候变暖背景下释放 CO<sub>2</sub> 的潜能, 具有很重要的现实意义和

收稿日期: 2010-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30440036); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项重点资助项目 (2007KYYW 04)

作者简介: 屈 冉 (1978–), 女, 河南潢川人, 博士, 主要从事环境生态与气候变化研究。

通讯作者: 李俊生 (1968–), 男, 安徽巢湖人, 研究员, 主要从事环境生态与气候变化研究。

理论价值。

1 研究区域概况

太白山处在我国暖温带和北亚热带分界线上,其山体上下高差达 3 000 m,气候垂直分异明显,自下而上可分为暖温带、温带、寒温带、亚寒带 4 个气候带。山顶局部地方终年积雪,夏短冬长,雨量充沛。受海拔和地形的影响,山体的上下年温约相差 13℃,年降水量 620~ 1 000 mm,多集中在 7~ 9月,其中以中山为最高,达 800~ 1 000 mm。太白山北坡植被类型自下而上大体可分为:①落叶阔叶林带:分布于海拔 780~ 1 300 m,人类活动频繁。林地土壤为山地褐土。乔木层建群种为栓皮栎 (*Quercus variabilis*)和侧柏 (*Platycladus orientalis*);②阔叶栎林带:分布于海拔 1 300~ 2 300 m。土壤为山地褐土和山地棕壤。乔木层主要为锐齿栎 (*Quercus aliena*)和辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)。灌木层主要有黄栌 (*Cotinus coggygria*)、孩儿拳头 (*Grewia biloba*)、绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)等;③桦木林带:分布于海拔 2 300~ 2 800 m。乔木层以红桦 (*Betula albosinensis*)和牛皮桦为主 (*Betula utilis*)。林下灌木层主要有箭竹 (*Fargesia*)、太白杜鹃 (*Rhododendron*)、峨眉蔷薇 (*Rosaceae*)、华西忍冬 (*Lonicera*)、绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)等;④秦岭冷杉林带:分布于海拔 2 800~ 3 300 m,乔木层主要为秦岭冷杉 (*Abies chensiensis*);⑤太白红杉林带,乔木层主要为太白红杉 (*Larix chinesis*);⑥高山灌丛草甸带:分布于海拔 3 400~ 3 767 m。灌木层主要有头花杜鹃 (*Rhododendron capitatum*)、高山绣线菊 (*Spiraea salicifolia*)等。

2 测定方法和试验设计

沿海拔梯度方向,采用 GPS 定位,并结合海拔表 (180 K)方法,每隔 150 m 的海拔梯度设置样地,样地覆盖太白山北坡所有 6 个垂直植被类型:落叶阔叶林带、阔叶栎林带、桦木林带、秦岭冷杉林带、太白红杉林带、高山灌丛草甸带的样地代号依次是 LYKY、LL、HM、LS、HS、CD,各样地特征见表 1。在 2008 年 6~ 7 月,采用便携式土壤呼吸仪 ACE (夏季土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率比其他季节的高,所以选择具有代表性的夏季),逐日从高海拔到低海拔测定 8 00~ 18 00 的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率 (一个样地测定完之后,再测定下一个样地),每 30 min 测定 1 次。每日多个时点观测的平均值为土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率,并用于数据分析。测定土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的同时,把土

壤呼吸仪附带的 4 个温度传感器分别插入土层深度 0~ 5, 5~ 10, 10~ 15, 15~ 20 cm,以便测定相应的温度。

采用 SPSS13.0 统计分析软件和 Origin7.5 数据分析软件进行数据分析和处理。

土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与土壤温度以及地表气温之间的关系采用指数模型模拟,即通过土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率和温湿度之间的回归方程分析获得  $R_0$  和  $\beta$ 。

$$R_s = R_0 e^{\beta T}$$

$R_s$  为土壤 CO<sub>2</sub> 释放平均速率 ( $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ );  $T$  为日平均土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $R_0$  为  $0^{\circ}\text{C}$  的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率 ( $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ );  $\beta$  为温度反应系数。

温度敏感性指数  $Q_{10}$  值是指温度升高  $10^{\circ}\text{C}$  时土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率变化的倍数:

$$Q_{10} = e^{10\beta}$$

式中,  $\beta$  为温度反应系数。

表 1 植被概况

Tab 1 Outline of vegetations				
植被类型 Vegetation type	海拔 /m Altitude	土壤含水量 % Water content of soil	郁闭度 % Canopy	坡度 / $^{\circ}$ Slope
CD (2)	3 450	40.23	0	10
CD (1)	3 400	39.11	0	10
HS (2)	3 365	46.46	45	5
HS (1)	3 300	41.78	55	25
LS (3)	3 120	60.78	50	5
LS (2)	3 015	60.12	55	35
LS (1)	2 800	53.18	55	20
HM (3)	2 560	25.79	65	10
HM (2)	2 400	26.12	60	25
HM (1)	2 280	25.74	55	20
LL (3)	2 160	23.57	60	25
LL (2)	1 905	24.12	70	5
LL (1)	1 650	23.21	70	5
LYKY (3)	1 260	22.54	70	20
LYKY (2)	1 015	29.42	60	5
LYKY (1)	715	21.31	25	15
YS (2)	650	20.18	50	5
YS (1)	550	20.14	45	5

3 结果与分析

3.1 不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放日变化规律

从图 1 可以看出, 8 00~ 11: 00 太白山 6 种植被类型以及人工林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率升高, 在 11: 00~ 16 00 期间达到峰值。阔叶栎林、桦木林和落叶阔叶林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率为 3.00~ 7.00  $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ , 最小值在 2.31  $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ , 最高值都超过 3.62  $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ , 海拔 1 260 m 的落叶阔叶林、1 656 m 的阔叶栎林、2 160 m 的阔叶栎林和 2 400 m 的桦木林的最高值分别为 9.34 9.38 8.11 和 9.76  $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 。而太白红杉林、秦岭冷杉林

和高山草甸土壤  $\text{CO}_2$  释放速率仅为 1.41~2.17, 最高值和最低值都相对较低。土壤  $\text{CO}_2$  释放平均速率的大小顺序是: 阔叶栎林 > 桦木林 > 落叶阔叶林 > 杨树林 > 太白红杉林 > 秦岭冷杉林 > 高山草甸。

阔叶栎林和桦木林土壤  $\text{CO}_2$  释放速率最高值约是最低值的 3 倍, 波动幅度相对较大, 而太白山其他植被类型的土壤  $\text{CO}_2$  释放速率最高值是最低值的 2 倍左右。

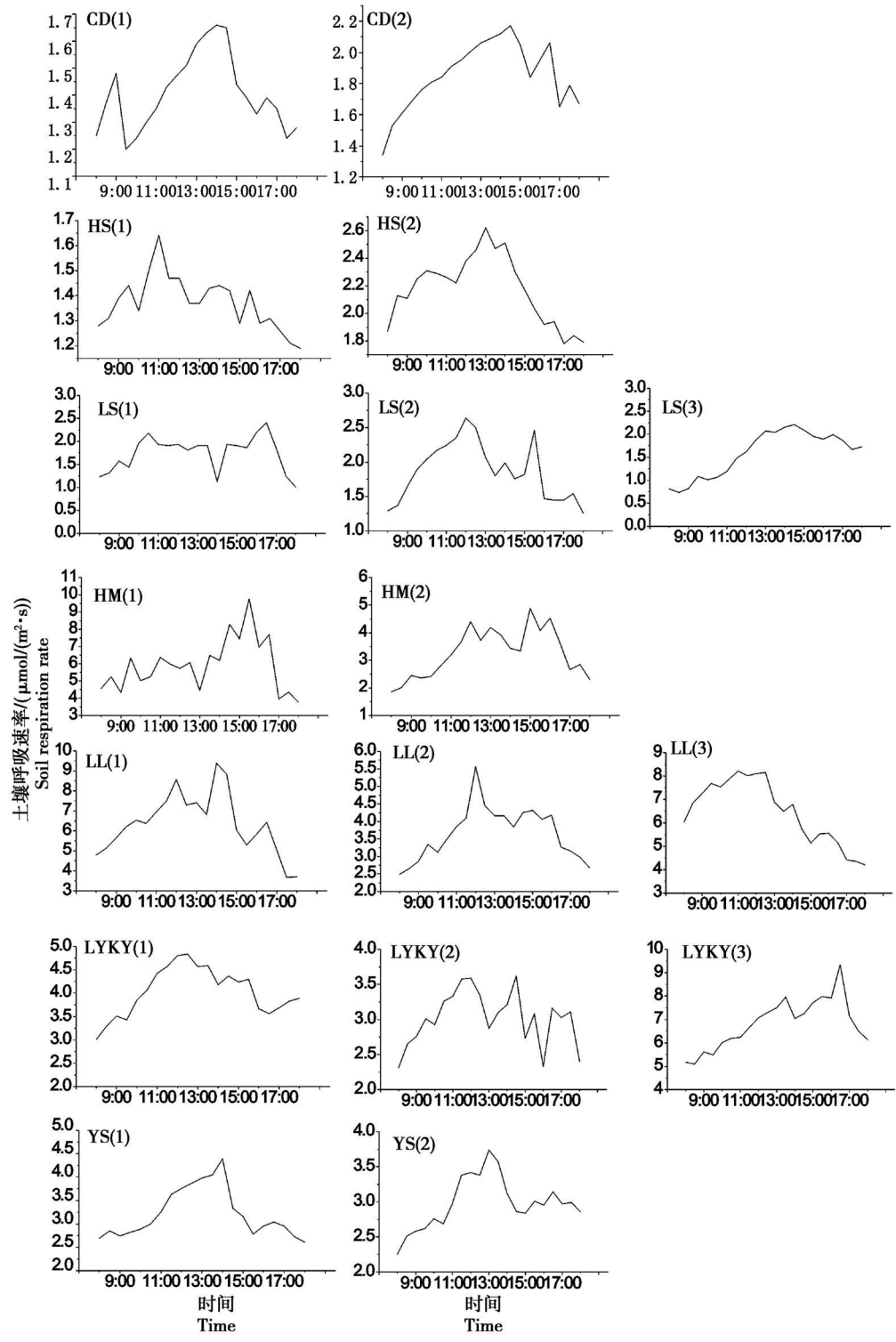


图 1 太白山不同植被类型土壤  $\text{CO}_2$  释放速率日变化

Fig 1 Diurnal variation of release of soil  $\text{CO}_2$  of different vegetations in Taibai mountain

3 2 土壤呼吸速率与温湿度的相关性

从表 1 可以看出, 海拔 550~2 800 m 的人工林、落叶阔叶林、阔叶栎林和桦木林不同土层的平均

温度以及气温都在  $10^\circ\text{C}$  以上, 而海拔 2 800 m 以上的秦岭冷杉林、太白红杉林和高山草甸的温度都低于  $10^\circ\text{C}$ 。

表 1 不同植被类型土层温度和气温

Tah 1 Soil temperature and air temperature of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	t		T <sub>1</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>3</sub>		T <sub>4</sub>		℃
	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高	
	Average	Maximum	Average	Maximum	Average	Maximum	Average	Maximum	Average	Maximum	
CD (2)	17. 05	20 6	12 67	14 90	10. 08	12 60	11. 16	14 40	7. 67	10. 00	
CD (1)	14. 82	18 9	11. 88	12 50	9. 43	11. 60	8 66	10 50	8 07	9 50	
HS (2)	15. 37	21 5	5 07	6 80	1 37	2 30	2 05	3 00	0 34	0 40	
HS (1)	17. 61	21 4	9 65	12 20	9 04	10 50	8 61	10 10	6 47	8 20	
LS (3)	15. 86	19 1	10 35	13 80	5 92	11. 00	5 77	10 30	9 79	15 00	
LS (2)	13. 57	15 6	6 81	7 30	5 56	6 30	3 64	4 10	4 79	5 30	
LS (1)	17. 93	19 6	9 63	10 30	9 16	10 10	8 66	9 50	7 80	8 60	
HM (2)	16 61	17 8	11. 90	12 30	12 06	13 80	11. 45	14 10	10 20	10 50	
HM (1)	22 14	26 9	17 40	20 50	15 16	16 80	14 00	16 30	13 96	15 90	
LL (3)	15. 18	17 2	13 40	13 90	12 75	13 00	12 23	12 40	12 58	12 70	
LL (2)	19 55	20 9	16 43	17 20	15 45	16 20	13 49	14 00	13 39	13 80	
LL (1)	24 09	34 0	21 56	27 80	17 39	20 00	16 46	18 20	14 80	15 80	
LYKY (3)	23 17	27 6	18 77	19 40	17 18	17 70	16 99	17 30	16 99	17 30	
LYKY (2)	24 28	25 9	20 24	21 20	18 07	18 70	18 20	18 80	17 87	18 30	
LYKY (1)	29 39	33 1	25 91	28 30	23 40	24 80	23 34	24 80	23 03	24 30	

注: T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>和 t代表土层深度分别为 0~ 5、5~ 10、10~ 15、15~ 20 cm 处的温度以及地表气温。

Note T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, t Soil temperature at the depth of 0- 5, 5- 10, 10- 15, 15- 20 cm and air temperature.

表 2 土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与空气和土壤的  
温湿度间的相关系数

Tah 2 Correktion coefficient of Soil CO<sub>2</sub> flux  
and temperature humidity of soil and air

植被类型 V egetation type	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	t
CD (2)	0 816**	0 834**	0 743**	0 300	0 696**
CD (1)	0 671**	0 219	- 0 016	0 057	0 721**
HS (2)	0 153	- 0 134	- 0 113	0 211	0 542*
HS (1)	0 510*	0 156	0 246	0 480	0 498*
LS (3)	0 873**	0 740**	0 752**	0 726*	0 918**
LS (2)	0 254	- 0 105	- 0 123	- 0 127	0 567**
LS (1)	0 458*	0 451*	0 358	0 283	0 501*
HM (3)	0 769**	0 347	- 0 054	0 444	0 867**
HM (2)	0 523*	0 459*	0 321	0 342	0 635**
HM (1)	0 902**	0 698**	- 0 162	0 512	0 736**
LL (3)	0 772**	0 594**	0 205	0 125	0 812**
LL (2)	0 704**	0 273	- 0 182	- 0 356	0 711**
LL (1)	0 784**	0 765**	0 711**	0 619**	0 513*
LYKY (3)	0 451*	0 161	0 056	- 0 104	0 464*
LYKY (2)	0 596**	0 443*	0 271	0 163	0 616**
LYKY (1)	0 881**	0 851**	0 779**	0 753*	0 884**
YS (2)	0 636**	0 481*	0 286	0 183	0 655**
YS (1)	0 512*	0 297	- 0 051	- 0 328	0 571**

注: \*\* . 差异极显著 (P < 0. 01); \* . 差异显著 (P < 0. 05)。下同。

Note \*\* . Mean difference is significant at the 0 01 level\* . Mean difference is significant at the 0 05 level The same below.

从表 2 可以看出, 不同海拔的植被类型土壤呼吸速率与地表气温以及土层深度 0~ 5 cm 处的温度都呈极显著和显著相关性, 土壤呼吸速率与地表气温的相关系数比土壤温度与呼吸速率的相关系数; 不同植被类型土壤呼吸速率与相对应的土壤深度分别为 0~ 5、5~ 10、10~ 15、15~ 20 cm 处温度的相关系数有降低的趋势。总体上土壤呼吸速率与空气湿

度都呈负相关关系, 与土层不同深度湿度的关系比较复杂, 没有固定的规律, 关于这方面的研究还有待于进一步深入研究。下面就只进一步分析温度对土壤呼吸速率的影响。

3 3 不同植被类型土壤呼吸速率与温度的回归关系

太白山不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与温度呈正相关关系, 而通过回归分析进一步表明, 土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与地表气温呈指数关系 (表 3), 方程都呈极显著性, 回归系数 R<sup>2</sup> 为 0. 908 8~ 0. 221 1 (n = 10 P < 0 01)。不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率对地表气温的响应程度不同, Q<sub>10</sub> 值大小顺序是: 秦岭冷杉林 > 桦木林 > 阔叶栎林 > 高山草甸 > 落叶阔叶林 > 太白红杉林。秦岭冷杉林、桦木林、阔叶栎林的 Q<sub>10</sub> 值分别是 3. 76、3. 01、1. 88 这意味着这些植被土壤呼吸速率对温度反应比较敏感。

4 讨论

太白山不同植被类型以及人工林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率较高的时间段主要集中在 11: 00- 16: 00, 这之前许多研究结论相似, 例如, Xu 和 Ye<sup>[14]</sup> 发现内华达山脉 8 年生的西黄松人工林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率最小值在 9: 00, 最大值在 14: 00, Davilson 等<sup>[15]</sup> 发现土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率昼夜变化格局与土壤温度变化格局相似。长白山土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率在 12: 00- 14: 00 达到最大值, 其中春季土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率和土壤温度变化几乎同步, 而在夏季和秋季土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率对土壤温度的变化存在滞后现象<sup>[16]</sup>; 华北山地不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率峰值一般出现在 12: 00- 15: 00<sup>[17]</sup>。

表 3 土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与温度的回归关系

Tab 3 The regression equation of soil CO<sub>2</sub> flux and temperature

植被类型 Vegetation type	回归系数 R <sup>2</sup> Coefficients of regress ion	P 检验值 Test value of P	F 检验值 Test value of F	回归方程 Regress ion equation	Q <sub>10</sub>
高山草甸	0.752 3	0.000 00	57.700 3 <sup>**</sup>	$R_s=0.8927e^{0.0375T}$	1.45
太白红杉林	0.319 8	0.007 54	8.934 7 <sup>*</sup>	$R_s=1.2521e^{0.0207T}$	1.23
秦岭冷杉林	0.822 9	0.000 00	88.263 6 <sup>**</sup>	$R_s=0.217e^{0.1324T}$	3.76
桦木林	0.651 1	0.000 03	35.457 5 <sup>**</sup>	$R_s=0.5270e^{0.1102T}$	3.01
阔叶栎林	0.604 0	0.000 03	28.984 0 <sup>*</sup>	$R_s=1.5634e^{0.0633T}$	1.88
落叶阔叶林	0.413 8	0.001 66	13.725 3 <sup>*</sup>	$R_s=1.6343e^{0.0304T}$	1.36

不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放平均速率的大小顺序是: 阔叶栎林 > 桦木林 > 落叶阔叶林 > 太白红杉林 > 秦岭冷杉林 > 高山草甸。虽然植被是影响土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的主要因素之一, 但是在不同的海拔高度, 土壤的水热条件是不同的, 这些因子及其之间的相互藕合是土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率产生差异的主要原因<sup>[18-19]</sup>。就太白山而言, 温度对不同海拔高度林分的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的作用要多于湿度。这与前人的研究结果类似<sup>[20-21]</sup>。阔叶栎林、桦木林和落叶阔叶林的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率变化范围分别是 3.53 ~ 7.41, 3.05 ~ 6.92, 3.47 ~ 5.35 μmol/(s·m<sup>2</sup>), 波动幅度比较大, 这与太白山山脚下人工林的比较相似(变化范围分别是 2.61~ 4.39, 2.25~ 3.74 μmol/(s·m<sup>2</sup>))。太白红杉林、秦岭冷杉林和高山草甸土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率变化范围分别是 1.49~ 2.0, 1.11~ 2.09, 1.30~ 1.91 μmol/(s·m<sup>2</sup>), 相比之下这三种植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率波动幅度较小。阔叶栎林、桦木林和落叶阔叶林的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率变化范围, 与黑龙江帽儿山地区温带次生林和落叶松人工林的 0.43~ 7.26, 0.63~ 4.70 μmol/(s·m<sup>2</sup>) 相近<sup>[22]</sup>, 与云杉林 1.6 ~ 6.0 μmol/(s·m<sup>2</sup>) 的变幅也接近<sup>[23]</sup>。

除了阔叶栎林和杨树的土层深度为 10~ 15, 15 ~ 20 cm 处温度之外, 不同植被类型的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与其他温度都呈正相关关系; 与地表气温和土层深度 0~ 5 cm 处的相关系数最高, 这与彭家中等<sup>[24]</sup>的研究结论是一样的; 在 0~ 20 cm 土层深度范围内, 随着土壤深度的增加, 则土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与土层温度的相关系数随之降低。除秦岭冷杉林之外, 不同植被类型土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与地表空气湿度都呈负相关关系, 与土层不同深度湿度的关系比较复杂, 没有固定的规律。土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与温度呈负相关关系, 是由于测定土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的前几天刚下过雨, 湿度比较大, 抑制了微生物、根系以及酶的活性, 所以呼吸速率较低<sup>[24-15]</sup>。但是也有研究发现西双版纳热带森林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率

与地下 5 cm 的相关系数高于气温<sup>[25]</sup>, 川西亚高山针叶林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与土层 15 cm 处温度相关性高于其他土层的温度<sup>[26]</sup>, 这可能是由于太白山土壤微生物主要分布在土层 5 cm 处以及此处植物根系呼吸旺盛, 并且由于随着土层深度的增加, 温度的变化幅度也在逐步减小, 与土壤 CO<sub>2</sub> 释放之间的相关性也就降低了。这说明在秦岭太白山等生态交错带, 全球变暖造成土壤有机质分解的速率比在其他区域要高出许多。

通过回归分析进一步表明, 太白山不同植被土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率与地表气温呈指数关系, Nina 研究德国云杉林以及常建国等研究的宝天曼自然保护区等都有类似的发现<sup>[23-21]</sup>。Q<sub>10</sub> 值的变化呈单峰曲线, 随着海拔的升高 Q<sub>10</sub> 值增大, 到了海拔 3 200 m 以上的太白红杉林和高山草甸 Q<sub>10</sub> 值又有所下降。这一方面可能是由于太白山海拔 3 200 m 以上常年气温低, 使得微生物和植物根系的生物活性受到限制, 导致土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率一直处在较低的水平, 正像图 1 所示的那样呼吸速率全天波动不大, 因而土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率对温度的敏感性不明显; 另一方面由于秦岭是我国南北气候的分界线的地方, 其气候受到南北气流的影响, 尤其是太白山 2 800~ 3 200 m 处全天气候变化无常<sup>[13]</sup>, 气温忽高忽低, 导致土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率波动大, 对温度反应较灵敏。秦岭冷杉林、桦木林的 Q<sub>10</sub> 值分别是 3.76, 3.01, 比北亚热带向南暖温带的过渡区域的宝天曼的 Q<sub>10</sub> 值 2.82 还要高。这说明处在太白山 2 400~ 2 800 m 的桦木林和 2 800~ 3 200 m 的秦岭冷杉林土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率对温度尤其敏感。

通过对秦岭太白山土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率的初步分析表明, 与别处土壤相比, 太白山土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率变化有共性, 也有其特性, 共性就是其日变化规律及变化幅度与别的地方相似, 特性就是土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率随着海拔升高并非全都升高, 并且其 Q<sub>10</sub> 值也是比较高的。就不同植被之间比较而言, 落叶阔叶林、阔叶栎林、桦木林的土壤 CO<sub>2</sub> 释放速率

高,而阔叶栎林、桦木林和秦岭冷杉林地表气温的  $Q_{10}$  值较高,综合分析得出,当气温升高时,阔叶栎林、桦木林和秦岭冷杉林会释放出较多的 CO<sub>2</sub>。作为中国南北气候分界线的秦岭以及秦岭主峰太白山,对气候变化就更为敏感。因此,不难预测,在当今全球气候暖化背景下太白山这样的生态交错带的海拔 1 600~3 200 m 处土壤会对气候变化做出显著的响应。

## 参考文献:

- [1] Watson R T, Noble I R, Boblin B, *et al* Land use, land-use change, and Forestry[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7–20.
- [3] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1995, 9: 23–26.
- [4] Janssens L A, Lankreijer H, Matteucci G, *et al* Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forest[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269–278.
- [5] Sinspeijer Y, Akiko S, Masaki U, *et al* Carbon and nitrogen limitation to microbial respiration and biomass in an acidic sulfate field[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43: 1–13.
- [6] David T T, Mark G J, Henry E J, *et al* Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on soil respiration under ponderosa pine[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 1764–1778.
- [7] Tang J W, Paul V B, Ankur R D, *et al* Ecosystem respiration and its components in an old-growth forest in the Great Lakes region of the United States[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 171–185.
- [8] Han G X, Zhou G S, Xu Z, *et al* Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 418–425.
- [9] Richard T C, Peter D-B, Carole C K, *et al* Controls on soil respiration in semiarid soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 35: 945–951.
- [10] Yukiko S B, Takayuki A, Tsushi K, *et al* Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22: 205–210.
- [11] Gaele V, Ali R S, Eric L, *et al* Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2527–2535.
- [12] 康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774–2784.
- [13] 刘洪滨, 邵雪梅. 利用树轮重建秦岭地区历史时期初春温度变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 879–884.
- [14] XU M, Y E Q. Soil surface CO<sub>2</sub> efflux and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667–677.
- [15] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent of confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hard forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217–227.
- [16] 郑兴波. 长白山阔叶红松林土壤呼吸变化规律及驱动机制的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [17] 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 20–26.
- [18] 刘华, 臧润国, 江晓珩, 等. 天山云杉天然林分土壤呼吸速率的时空变化规律分析[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(4): 568–578.
- [19] Lin Yan J, Yue X, *et al* Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 490–503.
- [20] Kang S Y, Doch S Y, Lee D S, *et al* Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1427–1437.
- [21] 常建国, 刘世荣, 史作民. 北亚热带–南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1791–1802.
- [22] 周海霞, 张彦东, 孙海龙, 等. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2668–2674.
- [23] Nina B. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1625–1635.
- [24] 彭家中, 常宗强, 冯起. 温度和土壤水分对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(3): 165–169.
- [25] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97–103.
- [26] 陈宝玉, 刘世荣, 葛剑平, 等. 川西亚高山针叶林土壤呼吸速率与不同土层温度的关系[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1219–1224.